

УДК 681.785.554

И. М. ГУЛИС, А. Г. КУПРЕЕВ

СПЕКТРАЛЬНАЯ СЕЛЕКЦИЯ В МОНОХРОМАТОРЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ С ВЫЧИТАНИЕМ ДИСПЕРСИИ

Теоретически обоснована возможность получения изображения протяженного объекта в узком спектральном диапазоне при использовании монохроматора с вычитанием дисперсии. Полученные выражения для ширины полосы пропускания подтвердили независимость спектрального разрешения системы, построенной на базе дифракционного монохроматора с вычитанием дисперсии, от ширины входной апертуры. Спектральное разрешение определяется постоянной решетки, фокусным расстоянием объектива и шириной щелевой маски (промежуточной щели). Спектральная полоса, в пределах которой регистрируется изображение, отличается для разных его точек. Мультиспектральное изображение объекта формируется спектральным сканированием в пределах рабочего диапазона и «склеивкой» по спектральной координате полученного набора изображений.

Ключевые слова: монохроматор изображения; диспергирующая система; мультиспектральный анализ.

The possibility of imaging an extended object in the narrow-band spectral range using a monochromator with dispersion subtraction demonstrated. The derived expressions for the bandwidth are indicative of the fact that the spectral resolution is independent of the entrance aperture width for the apparatus based on a diffraction monochromator with dispersion subtraction. The spectral resolution was determined by the grating period, focal distance of lens, and width of the intermediate aperture. The registered spectral band varies for different image points. A full multispectral image can be formed by scanning in the working spectral range and merging of the obtained frames by spectral coordinate.

Key words: image monochromator; dispersive system; multispectral analysis.

Спектроскопия с пространственным разрешением (СПР) применяется в экологии [1], геологии [2], промышленности и мониторинге [3] и других областях. Непосредственной задачей СПР является получение гиперспектрального изображения, спектрального гиперкуба (далее – гиперкуб) – массива данных, содержащего спектральную информацию от каждого квазиточечного элемента исследуемой области. Подходы к получению СПР отличаются количеством регистрируемой информации и способом проекции гиперкуба на детектор.

По объему регистрируемой спектральной информации отличают мультиспектральный (мультизональный) и гиперспектральный анализ. Мультиспектральные методы обеспечивают регистрацию квазимонохроматических изображений объектов в небольшом ($\sim 10^1$) наборе относительно широких (4–40 нм) спектральных полос. Гиперспектральные методы позволяют получить спектр для каждой малой области (точки) двумерного изображения объекта с существенно более высоким разрешением, достигающим до единиц и долей нанометра [4]. Выбор одного из указанных подходов определяется балансом между требуемым объемом гиперкуба и сложностью (стоимостью) системы.

Категоризация СПР также проводится по части гиперкуба, одновременно регистрируемой на детекторе [5]. При точечном сканировании (whiskbroom) на линейном детекторе регистрируется одно измерение гиперкуба – спектральное распределение квазиточечного элемента исследуемой области, формируемое дисперсионным полихроматором [6]. После поочередного сканирования всех точек исследуемой области формируется гиперкуб. При щелевом сканировании (pushbroom) на матричном фотодетекторе регистрируется двумерное сечение спектрального гиперкуба в спектральной и одной пространственной координатах [7]. Способы перемещения входной щели включают движение платформы-носителя (летательный аппарат, спутник), сканирующую систему зеркал, микромеханические системы, например на базе микрозеркальной матрицы [8]. Особенностью регистрации в этом случае

является взаимозависимость пространственного и спектрального разрешений, а также невозможность единовременной регистрации спектрального «снимка» объекта в узком спектральном диапазоне. При узкополосной спектральной фильтрации на детекторе регистрируется пространственное «сечение» гиперкуба [9], для формирования гиперкуба проводится сканирование по спектральной координате. Используемые для этого переключаемые полосовые светофильтры и перестраиваемые узкополосные акусто-, электрооптические, интерференционно-поляризационные фильтры имеют ряд ограничений: невысокое спектральное разрешение, недостаточное подавление фона за пределами номинально выделяемого спектрального диапазона, малую светосилу, сложность аппаратной реализации. Ряд методов СПР предлагает регистрацию спектрального гиперкуба в целом за счет проецирования нескольких сечений гиперкуба на двумерный или многослойный фотодетектор [10–12]. При этом сокращается время получения гиперкуба, увеличивается светопропускание системы. Однако современный уровень техники (размер и количество пикселей фотодетектора, абберационные искажения при формировании протяженного изображения) накладывает ограничения на число одновременно регистрируемых элементов гиперкуба.

Анализ аппаратных решений для СПР позволяет сделать заключение о перспективности разработки монохроматора изображения – прибора для узкополосной спектральной фильтрации на базе дисперсионного монохроматора. Использование диспергирующей системы для спектральной фильтрации потенциально обеспечивает улучшенное спектральное разрешение и подавление фона по сравнению с системами на базе полосовых или перестраиваемых фильтров (значимость последнего существенно возрастает при уменьшении спектральной ширины выделяемой полосы). Отличие от систем со сканирующей щелью – независимость спектрального и пространственного разрешений, за счет чего возможно увеличение входной щели для единовременной регистрации всей входной апертуры. Отметим, что для рутинных задач мультиспектральной съемки достаточным является разрешение на уровне 10 нм (современные спутниковые мультиспектральные сенсоры обеспечивают ширину регистрируемых полос 20–75 нм в видимом диапазоне [13]). В то же время к изображающим характеристикам оптической системы прибора предъявляются гораздо более высокие требования, чем к гиперспектрометрам со сканирующей щелью, поскольку работа осуществляется с протяженным в двух измерениях входным полем.

В работе [14] предложен метод узкополосной спектральной селекции на основе двойного монохроматора с вычитанием дисперсии. На выходе первого монохроматора формируется совокупность смещенных друг относительно друга хроматических изображений широкой входной апертуры. При помощи щелевой маски из полученной картины выделяется участок, отвечающий набору изображений апертуры для длин волн выделяемой спектральной полосы. Этот участок подается на вход второго монохроматора с вычитанием дисперсии, формирующего изображение входной апертуры без спектрального «размытия». Существенной особенностью схемы является вычитание дисперсии обратным прохождением выделенного маской пучка через ту же оптическую систему, что автоматически обеспечивает требуемую идентичность двух монохроматоров и позволяет сканировать по спектральному диапазону поворотом диспергирующего элемента. Симметричный разворот светового пучка для обратного прохождения через оптическую систему осуществляется посредством двух плоских зеркал, расположенных подобно уголкового отражателю таким образом, чтобы в их бисекторной плоскости формировалось промежуточное изображение (в ней же расположена щелевая маска).

Спектральное разрешение при таком подходе определяется шириной щелевой маски, пространственное разрешение лимитируется абберационными характеристиками изображающей системы и пиксельностью детектора. Достоинствами подхода являются светосила, существенное подавление «белого» фона, простота реализации спектральной перестройки.

В настоящей работе проводится оценка возможности спектральной фильтрации в рамках предложенного метода. Основной задачей является получение выражения для распределения спектральной интенсивности в плоскости фотоприемника после прохождения с вычитанием дисперсии. Характеристики спектрального прибора могут быть описаны посредством дисперсионной аппаратной функции, отвечающей распределению интенсивности излучения на выходе прибора при подаче на его вход монохроматического излучения от точечного источника. В пренебрежении абберациями в приближении оптической системы с плоскостью симметрии (у обсуждаемого монохроматора изображения она отвечает направлению дисперсии и проходит через центр дифракционной решетки) и прямоугольного отверстия в маске задача может решаться как одномерная. Дисперсионная аппаратная функция $A(x, x', \lambda)$ связывает координату x' в плоскости изображения первого монохроматора X' с координатой x на входной апертуре X и длиной волны λ . Распределение интенсивности в X' имеет вид

$$I'(x', \lambda) = \int_{x \in X} A(x, x', \lambda) I(x, \lambda) dx, \quad (1)$$

где $I(x, \lambda)$ – распределение интенсивности на входной апертуре X . Функцию пропускания щелевой маски можно представить как

$$\Pi(x') = \begin{cases} 1, & x'_1 \leq x' \leq x'_2, \\ 0, & x \in (-\infty, x'_1) \cup (x'_2, +\infty), \end{cases} \quad (2)$$

где x'_1, x'_2 – координаты краев отверстия в маске. Пусть дисперсионная аппаратная функция монохроматора вычитания дисперсии $B(x', x'', \lambda)$, где x'' – пространственная координата на выходной апертуре. Тогда спектральное распределение на выходе монохроматора

$$\begin{aligned} I''(x'', \lambda) &= \int_{x' \in X'} B(x', x'', \lambda) \Pi(x') I'(x', \lambda) dx' = \\ &= \int_{x' \in X'} \int_{x \in X} B(x', x'', \lambda) \Pi(x') A(x, x', \lambda) I(x, \lambda) dx dx'. \end{aligned} \quad (3)$$

Дальнейший расчет проведем с учетом конкретного вида дисперсионных аппаратных функций прямого и обратного прохождения. В качестве простой оценки положим, что у обеих дифракционных диспергирующих систем эти функции пропорциональны дельта-функциям в точке, определяемой основным уравнением решетки. Отсчет координат в плоскостях объекта и изображения будем проводить от осевого луча, который проходит через центры объективов, падает на дифракционную решетку под углом α_0 , а дифрагирует под углом β_0 .

Для произвольного луча длины волны λ уравнение решетки имеет вид

$$\frac{k\lambda}{b} = \sin(\alpha_0 + \Delta\alpha) + \sin(\beta_0 + \Delta\beta), \quad (4)$$

где $\Delta\alpha$ и $\Delta\beta$ – отклонение, соответственно, падающего на дифракционную решетку и дифрагированного луча от осевого. При малых отклонениях (ширина апертуры много меньше фокусного расстояния объективов) $\cos \Delta\alpha \sim 1$ и $\cos \Delta\beta \sim 1$, откуда

$$\frac{k\lambda}{b} = \sin \alpha_0 + \sin \beta_0 + \frac{x}{f_{\text{col}}} \cos \alpha_0 + \frac{x'}{f_{\text{cam}}} \cos \beta_0, \quad (5)$$

где $f_{\text{col}}, f_{\text{cam}}$ – фокусное расстояние коллиматорного и камерного объективов первого монохроматора (прямого прохождения); b – постоянная решетки; k – порядок дифракции. После замены $p = f_{\text{col}} \cos \alpha_0$, $q = f_{\text{cam}} \cos \beta_0$, $C = \sin \alpha_0 + \sin \beta_0$ получаем

$$A(x, x', \lambda) = \frac{1}{p} \delta \left(C + \frac{x}{p} + \frac{x'}{q} - \frac{k\lambda}{b} \right). \quad (6)$$

Поскольку обратное прохождение осуществляется через ту же оптическую систему, а в проекции на плоскость дисперсии оптические пути считаем совпадающими, подобно (6),

$$B(x', x'', \lambda) = \frac{1}{q} \delta \left(C + \frac{x'}{q} + \frac{x''}{p} - \frac{k\lambda}{b} \right). \quad (7)$$

Подставляя (6) и (7) и интегрируя часть (3) по координате на входной апертуре с использованием фильтрующего свойства дельта-функции, получаем

$$\begin{aligned} \int_{x \in X} A(x, x', \lambda) I(x, \lambda) dx &= \frac{1}{p} \int_{x \in X} \delta \left(\frac{x}{p} - \left(\frac{k\lambda}{b} - \frac{x'}{q} - C \right) \right) I(x, \lambda) dx = \\ &= I \left(p \left(\frac{k\lambda}{b} - \frac{x'}{q} - C \right), \lambda \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Подставляя результат в (3), интегрируем по координате промежуточного изображения (щелевой маски)

$$I''(x'', \lambda) = \int_{x' \in X'} \frac{1}{q} \delta \left(C + \frac{x'}{q} + \frac{x''}{p} - \frac{k\lambda}{b} \right) \Pi(x') I \left(p \left(\frac{k\lambda}{b} - \frac{x'}{q} - C \right), \lambda \right) dx'. \quad (9)$$

После замены переменных $x' = q\sigma$

$$\begin{aligned} I''(x'', \lambda) &= \int_{\sigma} \delta \left(\sigma - \left(\frac{k\lambda}{b} - \frac{x''}{p} - C \right) \right) \Pi(q\sigma) I \left(p \left(\frac{k\lambda}{b} - \sigma - C \right), \lambda \right) d\sigma = \\ &= \Pi \left(q \left(\frac{k}{b} \lambda - \frac{1}{p} x'' - C \right) \right) I \left(p \left(\frac{k}{b} \lambda - \left(\frac{k\lambda}{b} - \frac{x''}{p} - C \right) - C \right), \lambda \right) = \\ &= \Pi \left(\frac{qk}{b} \lambda - \frac{q}{p} x'' - qC \right) I(x'', \lambda). \end{aligned} \quad (10)$$

Как следует из (10), при наличии щелевой маски после вычитания дисперсии на выходе системы изображение формируется ограниченным числом спектральных компонент, выделенных полосовой функцией. Таким образом, различным точкам входной апертуры отвечают различные спектральные интервалы. Учитывая вид полосовой функции (2), получаем спектральный интервал, в котором отобразится точка x'' :

$$\frac{b}{kq} \left(x'_1 + \frac{q}{p} x'' + qC \right) \leq \lambda \leq \frac{b}{kq} \left(x'_2 + \frac{q}{p} x'' + qC \right), \quad (11)$$

а его ширина

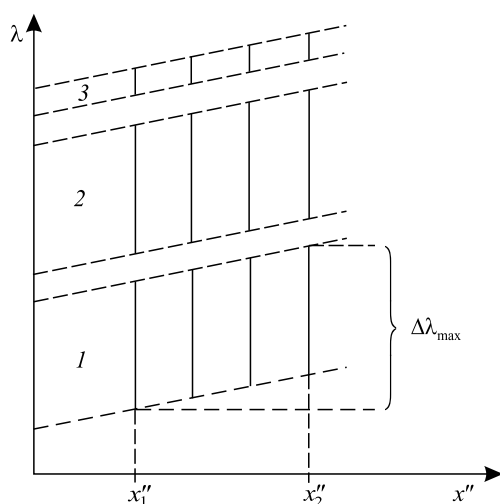
$$\Delta\lambda = \frac{b}{kq} (x'_2 - x'_1) = \frac{b \cos \beta_0}{kf_{\text{cam}}} \Delta d, \quad (12)$$

где Δd – ширина отверстия в маске в направлении дисперсии. Проведем количественную оценку. При решетке 1200 штр./мм, работающей в первом порядке дифракции, $\beta_0 \sim 90^\circ$, фокусном расстоянии объективов 500 мм и отверстия в маске шириной 6 мм выделяемый спектральный интервал по (12) составит 10 нм, при ширине маски 0,6 мм – 1 нм. На рисунке схематично показаны спектральные интервалы для точек выходной апертуры. Степень их смещения друг относительно друга определяется соотношением ширины отверстия в маске и выходной апертуры.

Из (11) аналогично (12) можно получить оценку максимального спектрального интервала на детекторе при фиксированном положении дифракционной решетки ($\Delta\lambda_{\text{max}}$ на рисунке)

$$\Delta\lambda_{\text{max}} = \frac{b}{k} \left(\frac{\cos \beta_0}{f_{\text{cam}}} \Delta d + \frac{\cos \alpha_0}{f_{\text{col}}} \Delta x'' \right), \quad (13)$$

где $\Delta x'' = x''_2 - x''_1$ – ширина выходной апертуры (детектора). При указанных выше параметрах дифракционной решетки и камерного объектива, фокусном расстоянии коллиматорного объектива 500 мм,



Положение выделяемых спектральных интервалов (сплошные вертикальные линии) для точек на выходной апертуре x'' при разных углах поворота дифракционной решетки (1, 2) и ширине отверстий в щелевой маске (2, 3); x''_1 , x''_2 – координаты краев выходной апертуры, $\Delta\lambda_{\text{max}}$ – спектральный диапазон регистрации для всей апертуры при одной установке дифракционной решетки

$\alpha_0 \sim 45^\circ$, и ширине детектора в направлении дисперсии 5,32 мм (что соответствует серийно выпускаемым матрицам 1/1,8") максимальный спектральный охват составляет 16,3 нм при ширине отверстия в маске 6 мм и 7,3 нм при 0,6 мм.

В то же время принципиально важно, что ширина выделяемой спектральной полосы для координаты x'' и сопряженной с ней x не зависит от ширины входной щели, а определяется размером отверстия в щелевой маске (12). Это позволяет использовать широкую входную апертуру для одновременного получения узкополосного спектрального изображения протяженных областей без ухудшения спектрального разрешения. При этом, поскольку разные точки входной апертуры (объекта) изображаются в смещенных друг относительно друга спектральных интервалах (см. рисунок), полное мультиспектральное изображение объекта можно восстановить путем сканирования по длинам волн в пределах рабочего спектрального диапазона и последующей математической обработки («склейки» по спектральной координате) полученного набора изображений. Указанное обстоятельство принципиально

отличает рассмотренную систему от широко распространенных мультиспектральных устройств типа pushbroom, у которых пространственное и спектральное разрешения увязаны с шириной входной щели.

Выполненный анализ подтверждает возможность формирования узкополосного спектрального изображения протяженной входной апертуры и позволяет оценить ширину спектральной полосы пропускания дифракционных монохроматоров с вычитанием дисперсии. Дисперсионные приборы с широкой входной апертурой для регистрации квазимонохроматических изображений являются перспективной альтернативой системам, в которых используются светофильтры. Спектральное сканирование поворотом диспергирующего элемента позволяет оперативно регистрировать весь гиперкуб или отдельные его области. Хотя спектральные характеристики принципиально не зависят от способа реализации вычитания дисперсии, рефлексивная оптическая схема на базе простых элементов (сферических объективов, плоских зеркал и отражательной дифракционной решетки) позволяет работать в широком спектральном диапазоне и делает конструкцию технологичной в изготовлении. Для практической реализации этих возможностей необходимо оптимизировать изображающие характеристики системы, уменьшив уровень aberrаций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Curran P. J. Imaging spectrometry for ecological applications // Intern. J. of Appl. Earth Observ. and Geoinform. 2001. Vol. 3, № 4. P. 305–312.
2. Van der Meer F. Imaging spectrometry for geological remote sensing // Geologie en Mijnbouw. 1998. Vol. 77, № 2. P. 137–151.
3. Herold M., Roberts D. A. Multispectral Satellites – Imaging Spectrometry – LIDAR: Spatial – Spectral Tradeoffs in Urban Mapping // Intern. J. of Geoinform. 2006. Vol. 2, № 1. P. 1–13.
4. Shaw G. A., Burke H. K. Spectral imaging for remote sensing // Lincoln Laboratory J. 2003. Vol. 14, № 1. P. 3–28.
5. Hagen N., Kester R. T., Gao L., Tkaczyk T. S. Snapshot advantage: a review of the light collection improvement for parallel high-dimensional measurement systems // Optical Engineering. 2012. Vol. 51, № 11. P. 111702-1–111702-7.
6. Green R. O., Eastwood M. L., Sarture Ch. M., Chrien T. G., Aronsson M., Chippendale B. J., Faust J. A., Pavri B. E., Chovit Ch. J., Solis M., Olah M. R., Williams O. Imaging spectroscopy and the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) // Rem. Sens. Environ. 1998. Vol. 65, № 2. P. 227–248.
7. Mouroulis P., Green R. O., Chrien T. G. Design of pushbroom imaging spectrometers for optimum recovery of spectroscopic and spatial information // Appl. Opt. 2000. Vol. 39, № 13. P. 2210–2220.
8. Воронай Е. С., Гулис И. М., Купреев А. Г., Каплевский К. Н., Костюшкевич А. Г., Радько А. Е., Шевченко К. А. Мультиобъектный спектрометр с микрозеркальной матрицей // ЖПС. 2010. Т. 77, № 2. С. 305–312.
9. Gat N. Imaging spectroscopy using tunable filters: a review // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4056. P. 50–64.
10. Gehm M. E., John R., Brady D. J., Willett R. M., Schulz T. J. Single-shot compressive spectral imaging with a dual-disperser architecture // Opt. Express. 2007. Vol. 15, № 21. P. 14013–14027.
11. Kudenov M. W., Jungwirth M. E. L., Dereniak E. L., Gerhart G. R. White-light Sagnac interferometer for snapshot multispectral imaging // Appl. Opt. 2010. Vol. 49, № 21. P. 4067–4075.
12. Gilblom D. L., Yoo S. K. Infrared and ultraviolet imaging with a CMOS sensor having layered photodiodes // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5301. P. 186–192.
13. Markham B. L., Dabney P. W., Murphy-Morris J. E., Pedelty J. A. The landsat data continuity mission operational land imager (OLI) radiometric calibration // Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE International, 25–30 July 2010, Honolulu. 2010. P. 2283–2286.
14. Гулис И. М., Купреев А. Г., Костюкевич А. Г. Двойной монохроматор изображения с вычитанием дисперсии // Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2011. № 2. С. 19–23.

Поступила в редакцию 19.05.2014.

Игорь Михайлович Гулис – доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии.
Александр Геннадьевич Купреев – научный сотрудник лаборатории нелинейной оптики и спектроскопии кафедры лазерной физики и спектроскопии и кафедры физической оптики.